

Variabilités pluviométriques de 1980 à 2022 et leurs incidences sur le système urbain d'assainissement pluvial dans la ville de Ndjamen a, Tchad

Marcelin DJIMASRA^{1*}, Guillaume EWODO MBOUDOU¹ et Auguste OMBOLO²

¹Ecole Nationale Supérieure Polytechnique de Maroua, Unité de Formation Doctorale Sciences de l'Ingénieur (Génie Civil, Hydraulique et Génie Textile), Laboratoire d'Hydraulique, BP 58 Maroua, Cameroun

²Université de Garoua, Direction des Infrastructures, BP 346 Garoua, Cameroun

(Reçu le 16 Octobre 2025 ; Accepté le 02 Janvier 2026)

* Correspondance, courriel : dmarcelin15@gmail.com

Résumé

La compréhension des variabilités pluviométriques dans un contexte sahélien caractérisé par une fluctuation climatique, constitue un vecteur déterminant pour une gestion pérenne des ressources hydriques et une planification stratégique des infrastructures en milieu urbain. L'étude porte sur les variabilités pluviométriques de 1980 à 2022 et leurs incidences sur le système urbain d'assainissement pluvial dans la ville de Ndjamen a (Tchad). Elle s'appuie sur un ensemble de méthodes statistiques avancées notamment les chaînes de Markov, les tests de ruptures de Pettitt et de Hubert, le test de Mann-Kendall saisonnier et la méthode Innovative Trend Analysis (ITA). Les résultats obtenus indiquent une tendance significative à l'humidification ($p = 0,0089$), avec une augmentation annuelle moyenne de pluviométrie de +4,74 mm. Les ruptures détectées en 1983, 1997 et 1999 confirment une transition vers un régime pluviométrique plus humide. L'analyse faite par la chaîne de Markov 1 montre une forte persistance de l'état pluviométrique normal ($p \approx 0,70$), expliquant le caractère généralement transitoire des épisodes extrêmes. À l'échelle saisonnière, seule la période juillet–septembre, présente une tendance significative à la hausse, traduisant une concentration accrue des pluies au pic de la saison humide. Ce pic accroît la vulnérabilité de la ville aux inondations, aux risques des crues éclairis et aux surcharges des réseaux d'assainissement pluvial. L'étude fournit ainsi une contribution scientifique significative à l'échelle de Ndjamen a et souligne l'intérêt d'approches intégrées et multiméthodes des variabilités pluviométriques dans les stratégies d'assainissement pluvial et de résilience de la ville.

Mots-clés : variabilité pluviométrique, tendance, assainissement pluvial, N'Djamena.

Abstract

Rainfall variability from 1980 to 2022 and its impact on the urban storm water drainage system in the city of Ndjamen, Chad

Understanding rainfall variability in a Sahelian context characterised by climate fluctuation is a key factor in sustainable water resource management and strategic infrastructure planning in urban areas. The study focuses on rainfall variability from 1980 to 2022 and its impact on the urban stormwater drainage system in the city of N'Djamena (Chad). It is based on a set of advanced statistical methods, including Markov chains, Pettitt and Hubert break tests, the seasonal Mann-Kendall test and the Innovative Trend Analysis (ITA) method. The results indicate a significant trend towards humidification ($p = 0.0089$), with an average annual increase in rainfall of +4.74 mm. The breaks detected in 1983, 1997 and 1999 confirm a transition to a wetter rainfall regime. The analysis performed by Markov chain 1 shows a strong persistence of normal rainfall conditions ($p \approx 0.70$), explaining the generally transient nature of extreme events. On a seasonal scale, only the July–September period shows a significant upward trend, reflecting an increased concentration of rainfall at the peak of the wet season. This peak increases the city's vulnerability to flooding, flash flood risks and overloading of storm water drainage systems. The study thus provides a significant scientific contribution at the scale of Ndjamen and highlights the value of integrated, multi-method approaches to rainfall variability in the city's storm water drainage and resilience strategies.

Keywords : *rainfall variability, trend, stormwater drainage, N'Djamena.*

1. Introduction

Dans un contexte mondial marqué par le changement climatique, l'urbanisation entraîne une altération des écosystèmes et intensifie les pluies de fortes durées [1, 2]. De ce fait, la stabilité du cycle hydrologique planétaire subit de mutation significative [3], conduisant à une modification inattendue des régimes pluviométriques à l'échelle globale [4 - 6]. Ces changements climatiques induisent une hausse concomitante des événements hydrométéorologiques extrêmes, notamment : (i) des sécheresses prolongées, et (ii) des précipitations intenses, avec des impacts significatifs sur les plans environnemental, économique et sanitaire, tant à l'échelle mondiale que régionale [7,8, 9]. Ils sont particulièrement visibles dans les régions sahéliennes [10], où les précipitations extrêmes augmentent en fréquence et en intensité. Des estimations récentes [11] indiquent une hausse de 5 à 20 % des précipitations extrêmes dans le bassin du Lac Tchad. Ces hausses de précipitations seraient attribuées au changement climatique. Ainsi, ce bassin du Lac Tchad figure parmi les régions les plus vulnérables à ces changements [12, 13]. Depuis les années 1980, le régime pluviométrique dans ce bassin est caractérisé par une alternance irrégulière entre épisodes secs et humides, avec une forte variabilité interannuelle et une recrudescence des événements extrêmes [10, 14, 15]. Il a été établi que la diminution de la pluviométrie annuelle résulte principalement d'une réduction de la fréquence des événements pluvieux au cours de la saison des pluies, et non d'une baisse significative de l'intensité moyenne par événement [16]. Cette dynamique a engendré un déficit hydrique persistant au cours des six dernières décennies, compromettant la gestion intégrée des ressources en eau [17]. En effet, la concentration accrue des précipitations sur de courtes périodes favorise la genèse de débits de pointe élevés et un taux d'imperméabilisation croissant, provoquant des débordements fréquents des systèmes de drainage souvent sous-dimensionnés ou mal entretenus [18, 19]. En dépit de l'intérêt scientifique de plus en plus croissant accordé à cette région [10, 14, 15], plusieurs zones du bassin restent encore peu étudiées. Ceci limite la compréhension fine des dynamiques pluviométriques locales sur l'hydrologie urbaine et l'efficacité des dispositifs d'assainissement pluvial. Une caractérisation précise des tendances pluviométriques est

néanmoins indispensable pour évaluer l'impact réel des épisodes pluvieux extrêmes propices aux inondations urbaines et aux risques sanitaires associés [20, 21]. Bien que certaines études aient mis en évidence une reprise partielle des précipitations au Sahel depuis le début des années 2000 [10], cette reprise demeure hétérogène, avec une concentration accrue des précipitations sur de courtes périodes [22]. Ces constats, rapportés à l'échelle régionale, impliquent qu'une analyse spatio-temporelle fine, conduite au niveau local, devient indispensable pour mieux appréhender la dynamique pluviométrique et ses impacts. C'est dans ce contexte que s'inscrit la présente étude, qui porte sur la ville de N'Djamena. Elle a pour objectifs d'analyser les variabilités pluviométriques sur la période 1980–2022 en s'appuyant sur des méthodes statistiques rigoureuses, et examiner leurs effets sur le fonctionnement et la résilience des réseaux d'assainissement pluvial.

2. Matériel et méthodes

2.1. Zone d'étude

La ville de N'Djaména, capitale du Tchad, est située à $12^{\circ} 03'$ et $12^{\circ} 20'$ de latitude Nord et $14^{\circ} 90'$ et $15^{\circ} 20'$ de longitude Est. Elle fait partie du bassin du Lac Tchad qui est un grand bassin endoréique avec une superficie de $2\ 381\ 000\ Km^2$ [23]. Cette ville s'étend sur plus d'une vingtaine de kilomètres le long de la rive droite du Chari en aval et en amont de sa confluence avec le Logone (**Figure 1**).

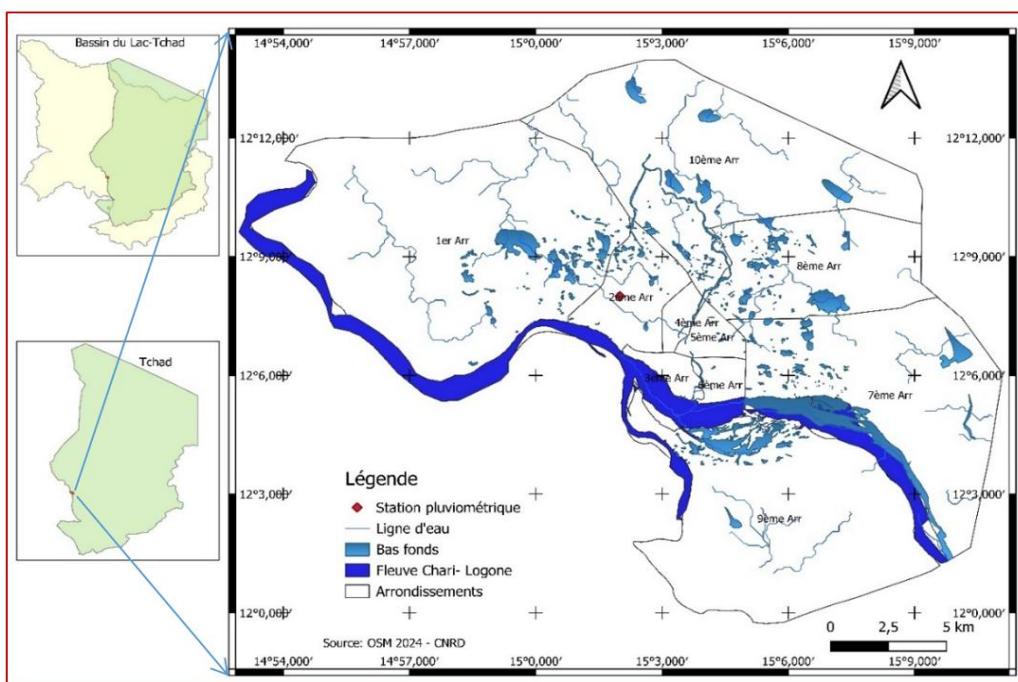


Figure 1 : Localisation de la ville de Ndjamen

Le climat de la zone d'étude est du type sahélien caractérisé par deux saisons contrastées, dont une longue saison sèche s'étendant sur 7 à 8 mois, de novembre à mai et une courte saison humide d'une durée 3 à 5 mois, de mai à octobre. Les précipitations annuelles varient entre 226,1 et 831,4 mm d'eau par an [24]. Le relief de N'Djaména est globalement plat (87,76 % de la superficie de la ville), et leur altitude varie de 277 m à 337 m (**Figure 2**). Le réseau hydrographique est constitué essentiellement du fleuve Logone et du fleuve Chari (**Figure 1**), principal contributeur de l'hydrosystème du lac Tchad [25]. N'Djaména est située dans une plaine alluviale très plate longée sur toute sa bordure sud par le fleuve Chari [26]. Ce type de relief ne favorise pas le drainage des eaux pluviales et provoque parfois de vastes inondations [27].

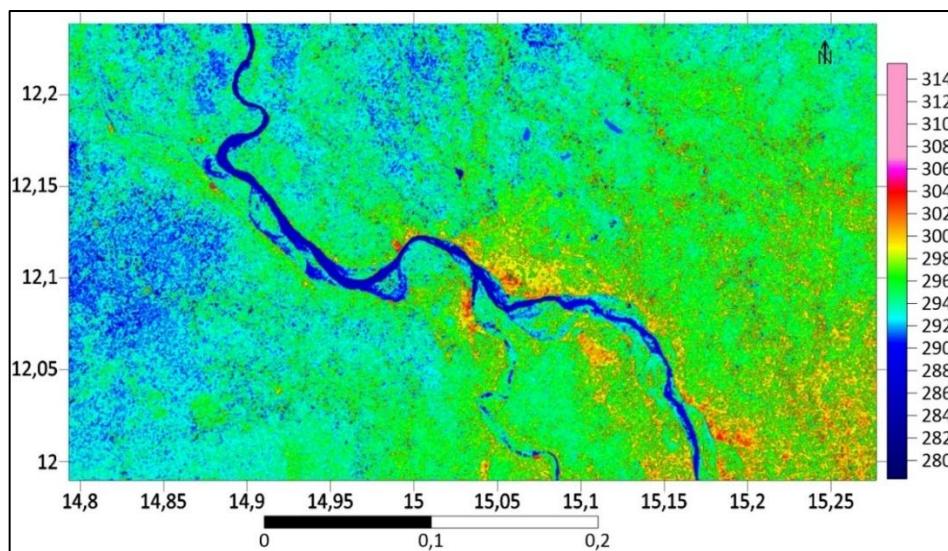


Figure 2 : Carte Morphologique de la ville de Ndjamenai

2-2. Données d'étude

Les données d'étude sont extraites des archives de l'Agence Nationale Météorologiques (ANAM) consultées en 2023. La station météorologique de Ndjamenai ($12^{\circ}08'N$ et $15^{\circ}02'E$) constitue l'unique source de données utilisées dans cette étude. Les séries pluviométriques associées sont complètes et ne présentent pas de lacunes sur toute la durée de l'étude. Elles sont récapitulées dans le **Tableau 1**.

2-3. Méthodes d'étude

L'approche méthodologique a été basée sur : i) une analyse de l'évolution interannuelle des précipitations ; ii) une analyse de l'évolution intra annuelle ; iii) la détection des ruptures au sein des séries pluviométriques ; iv) les analyses des tendances pluviométriques.

Tableau 1 : Moyenne mensuelle, total mensuel et total annuel des précipitations de la ville de Ndjamenai période (1980 - 2022)

Année	jan	fév	mars	avr	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	déc	cumul annuel
1980	0	0	0	0	43	80	83,8	103	49,7	37,5	0	0	397
1981	0	0	0	0	40,4	30,7	211,4	134,5	34,1	0	0	0	451,1
1982	0	0	0	8,9	3,9	37,5	72	181,2	51,3	27,2	0	0	382
1983	0	0	0	0	2,1	20,7	122,4	138,9	94,1	0	0	0	378,2
1984	0	0	0	47,4	21,7	35,4	70,2	34,2	16,6	0,6	0	0	226,1
1985	0	0	0	0	9,4	18,4	92,1	161,3	82,7	1,3	0	0	365,2
1986	0	0	1,4	6,1	17,7	13,8	236,2	129,1	151,2	0,3	0	0	555,8
1987	0	0	0	0	68,6	67,7	67,3	130,3	44,4	26,8	0	0	405,1
1988	0	0	0	0	56,9	24,4	191,8	202,7	154,3	0,6	0	0	630,7
1989	0	0	0	0	1,6	84	180,4	186,3	62,1	79,3	0	0	593,7
1990	0	0	0	0	4,2	17,1	171,8	81,7	14	1,4	0	6	296,2
1991	0	0	0	19,4	78,2	31,4	159,2	280,5	60,1	0,6	0	0	629,4
1992	0	0	1,2	4,3	21,9	57,3	149,9	166	109	27,7	0	0	537,3
1993	0	0	0	5,8	38,7	45,4	121	197,8	46	5	0	0	459,7
1994	0	0	0	17,5	0	42,9	164,6	233	149,3	20,5	0	0	627,8
1995	0	0	0	4	2,6	30,4	147,1	119,6	118,5	22,8	0	0	445
1996	0	0	0	16,2	19,6	21,8	103,9	224,7	60,1	51,7	0	0	498

1997	0	0	0	13,1	9,1	62,3	135,1	146	37,4	19,1	0	0	422,1
1998	0	0	0	10	11,2	88,2	239	287,4	117,7	22,4	0	0	775,9
1999	0	0	0	0	0	15	307,3	192,2	87,7	32,9	25,6	0	660,7
2000	0	0	0	0	59,8	90,8	249,7	196,8	40,4	39,1	0	0	676,6
2001	0	0	0	1,2	18,1	45,8	135,9	162,6	250,7	0	0	0	614,3
2002	0	0	0	0	0	42,4	122,1	147,4	151,8	80,3	0	0	544
2003	0	0	0	0,4	109,3	51,1	113,6	291,8	81,1	16,7	0	0	664
2004	0	0	0	38,7	55,1	52,8	175,5	142,9	51,6	27,6	0	0	544,2
2005	0	0	0	0	15,3	53,6	170,7	190,4	79,9	10,3	0	0	520,2
2006	0	0	0	1	31,7	87,4	174,8	295,2	83,5	37,6	0	0	711,2
2007	0	0	0	0	10,5	106,9	218,5	180	72,5	29,4	16,5	0	634,3
2008	0	0	0	0	44,7	50,5	215,8	297,8	38,5	8	0	0	655,3
2009	0	0	0	0	0	12,7	145	232,4	111,1	54,1	0	0	555,3
2010	0	0	0	0	1,8	51,5	215,3	122,6	155,7	20,7	0	0	567,6
2011	0	0	0	0	10,8	77,2	59,6	180,6	156,2	0	0	0	484,4
2012	0	0	0	0	30,1	53,8	154,3	266,9	94,3	13,8	0	0	613,2
2013	0	0	0	0	3,3	26,6	140,5	249,9	86,1	1,7	0	0	508,1
2014	0	0	0	1,9	28,4	4,6	173,1	189,8	114,1	17,1	0	0	529
2015	0	0	0	0	0,9	81,2	243,4	200,6	81,9	1,1	0	0	609,1
2016	0	0	0	0	25,8	47,9	211,2	210,4	137,7	25,2	0	0	658,2
2017	0	0	0	0	27,8	49,1	153,9	134,4	118,1	16,2	0	0	499,5
2018	0	0	0	30,5	61	58,7	300,7	227,3	64,4	11,9	0	0	754,5
2019	0	0	0	0	65,2	58,1	180,4	141,3	128,7	59,1	0	0	632,8
2020	0	0	0	0	4,4	35,6	271,9	334,5	185	0	0	0	831,4
2021	0	0	0	0	0	45,9	118,1	107,2	35,6	0	0	0	306,8
2022	0	0	0	17,8	18,2	22,6	184,8	194,8	63,2	0	0	0	501,4
cumul mensuel	0	0	2,6	244,2	1073	2031,2	7155,3	8028	3922,4	847,6	42,1	6	

2-3-1. Évolution interannuelle des précipitations

Pour étudier l'évolution interannuelle des précipitations, trois (03) méthodes ont été appliquées :

2-3-1-1. Méthode d'indice standardisé de précipitations

L'indice standardisé de précipitations (SPI) a permis d'observer la variabilité interannuelle des précipitations et d'identifier les années déficitaires et excédentaires. L'hypothèse émise pour l'appliquer est que la distribution des précipitations agrégées suit une loi gamma à deux paramètres [28], ajustée par maximum de vraisemblance et corrigée de la présence éventuelle de valeurs nulles [29]. La probabilité cumulée obtenue a été ensuite transformée en une valeur sur l'échelle de la loi normale centrée réduite, résumée suivant l'**Équation (1)**:

$$\text{SPI} = \Phi^{-1} \left(q + (1 - q) \cdot \int_0^x \frac{1}{\Gamma(\alpha)\beta^\alpha} t^{\alpha-1} e^{-t/\beta} dt \right) \quad (1)$$

où, Φ^{-1} : est la fonction quantile inverse de la loi normale standard, α : est le paramètre de forme ; β : le paramètre d'échelle, q : est la fréquence des valeurs nulles et $\Gamma(\alpha)$: est la fonction Gamma.

Le résultat est un indice adimensionnel qui a permis la classification des épisodes pluviométriques. Le package « SPEI » du logiciel R Studio, à travers la fonction « spi() », ont été utilisés pour le calcul des indices SPI.

2-3-1-2. Méthode de caractérisation de dynamiques de transitions pluviométriques

Pour caractériser la dynamique des transitions pluviométriques, deux modèles stochastiques ont été utilisés :

- Chaîne de Markov d'ordre 1 (MC1) : Elle suppose que la probabilité de transition vers un état X_t dépend uniquement de l'état immédiatement précédent X_{t-1} ;
- Chaîne de Markov d'ordre 2 (MC2) : Elle considère que l'état futur X_t dépend des deux états précédents X_{t-1}, X_{t-2} .

Les matrices de transition ont été estimées à partir des fréquences observées entre les classes. Les probabilités de transition ont été estimées par maximum de vraisemblance, en calculant les fréquences relatives d'occurrence des transitions observées entre états [30]. Dans cette étude, la chaîne de Markov est supposée ergodique, ce qui garantit l'existence d'une distribution stationnaire unique décrivant l'état d'équilibre du système. Cette distribution a été exploitée pour estimer les probabilités d'occurrence à long terme des différentes classes pluviométriques à partir des données annuelles (*Tableau 1*). L'incertitude associée aux probabilités de transition a été quantifiée à l'aide de simulations de Monte Carlo basées sur une distribution de Dirichlet, permettant de déterminer des intervalles de confiance à 95 %. Le logiciel R Studio a été utilisé pour estimer la chaîne de Markov à partir de la série pluviométrique annuelle à l'aide de la fonction « markovchainFit () ». La simulation de Monte Carlo, à l'aide du logiciel R Studio en utilisant la fonction « rdirichlet » du package « MCMCpack », a permis de générer des matrices de transition aléatoires et d'en déduire les intervalles de confiance à 95 %. Pour identifier le modèle le plus approprié (ordre 1 ou 2), deux critères d'information ont été exploités : AIC (Akaike Information Criterion) et BIC (Bayesian Information Criterion). Pour l'évaluation de ces critères d'information, les fonctions « AIC () » et « BIC () », du logiciel R Studio, ont été appliquées.

2-3-2. Méthodes de détection des ruptures

Pour déceler d'éventuels changements dans l'évolution des paramètres pluviométriques, des méthodes statistiques de détection de ruptures ont été utilisées : Le test de Pettitt et la méthode de segmentation de Hubert.

2-3-2-1. Test de Pettitt

Le test de Pettitt [31] est un test non paramétrique, qui a permis de découper la série de données d'étude en « n » éléments en deux sous série à chaque instant « t » compris entre 1 et n-1. L'absence d'une rupture dans la série chronologique X constitue l'hypothèse nulle H_0 . Dans cette étude, le package « trend » et la fonction « pettitt test » du logiciel R Studio ont été utilisés pour les données chronologiques pluviométriques annuelles d'étude (*Tableau 1*).

2-3-2-2. Méthode de segmentation de Hubert

Considérée comme un test de stationnarité, la procédure de segmentation a pour but de rechercher des changements multiples de moyennes au sein d'une série hydrométéorologique. Le principe consiste, selon [32], à « découper » la série en m segment(s) de telle sorte que la moyenne calculée sur tout segment soit significativement différente de celle du (des) segment(s) voisin(s). On considère de ce fait que l'hypothèse nulle H_0 signifie : « la série est stationnaire ». Si la procédure ne produit pas de segmentations d'ordre supérieur ou égal à 2, l'hypothèse nulle est acceptée. Pour cette méthode, le package « segmented » et la fonction « segmented () » du logiciel R Studio ont été utilisés.

2-3-3. Méthodes de détection des tendances dans les séries chronologiques des précipitations de la zone d'étude

2-3-3-1. Méthode d'estimation des tendances de la série chronologique de précipitation avec saisonnalité

Le principe est basé sur le test de Kendall saisonnier, proposé par [33]. Il permet d'estimer les tendances de séries cycliques saisonnières. L'absence de tendance monotone constitue l'Hypothèse nulle, par contre l'existence d'une tendance dans au moins une saison constitue une Hypothèse alternative. Le test de Mann-Kendall saisonnier a été mis en œuvre avec un pas trimestriel (3 mois), conformément aux procédures décrites par [33] pour détecter les tendances dans des séries temporelles à composantes saisonnières. Ainsi, les séries de données pluviométriques mensuelles (*Tableau 1*) ont servi pour estimer ces tendances saisonnières à partir de la statistique S_k de Kendall pour chaque saison [33] de la manière suivante dans *les Équations (2) et (3)*:

$$S_k = \sum_{i=1}^s S_i \quad (2)$$

où, i : est le nombre de saisons et S_i : sont les statistiques S de Mann-Kendall.

$$S_i = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}[(y_{ji} - y_{ki})(x_{ji} - x_{ki})] \quad (3)$$

et, σ_{S_k} est l'écart-type de S_k .

Pour évaluer la présence d'une tendance dans une série chronologique, le test statistique de Mann-Kendall normalisé a été appliqué. Le taux saisonnier associé à chaque période a été déterminé pour identifier la direction de la tendance. L'hypothèse nulle, postulant l'absence de tendance, est rejetée si la valeur de la distribution normale observée dépasse un seuil critique défini par le niveau de significativité choisi. Pour ce test, l'intervalle de confiance est porté à 95 %. Le test de Mann-Kendall saisonnier a été réalisé à partir du logiciel R Studio en utilisant le package « trend » et la fonction « kendallSeasonalTrendTest () ».

2-3-3-2. Méthode de détection des tendances dans la série chronologique des précipitations annuelles par la pente de Sen

L'approche par la pente de Sen [34] a permis d'évaluer l'ampleur de la tendance des effets climatiques dans la série annuelle des précipitations. Cette méthode a permis d'estimer l'intensité de la tendance climatique détectée par le test de Mann-Kendall. Ainsi, les estimations de la pente Sen « Q_i » de N paires de données de la série pluviométrique annuelle (*Tableau 1*) ont été calculées par les *Équations (4) et (5)* suivantes :

$$Q_i = \frac{x_j - x_k}{j - k} \text{ pour } i = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

où, x_j et x_k sont respectivement les valeurs des données aux instants j et k ($j > k$).

Les valeurs de Q_i ont été classées de la plus petite à la plus grande et l'estimateur de la pente de Sen a été calculé comme suit :

$$Q_i = \begin{cases} Q_{\left(\frac{N+1}{2}\right)} & \text{si } N \text{ est impair} \\ \frac{Q_{\left(\frac{N}{2}\right)} + Q_{\left(\frac{N+1}{2}\right)}}{2} & \text{si } N \text{ est paire} \end{cases} \quad (5)$$

La pente de Sen a été estimée dans logiciel R Studio à l'aide du package « trend » et de la fonction « sens.slope() ».

2-3-3-3. Méthode de détection des tendances par l'Innovative Trend Analysis

L'Innovative Trend Analysis (ITA) de Sen [34] offre une approche graphique non paramétrique pour détecter les tendances sans recourir à des hypothèses statistiques rigides. Pour la série chronologique des précipitations annuelles (**Tableau 1**), la méthode ITA a consisté à diviser la série chronologique de pluviométrie annuelle en deux sous-séries égales, puis à trier les valeurs pluviométriques annuelles x_i , par ordre croissant de chacune des moitiés : L'intensité de la tendance a été évaluée à l'aide de la pente moyenne entre les paires de données selon **l'Équation (6)**:

$$\beta_{\text{ITA}} = \sum_{i=1}^{n/2} \left(\frac{X_{2i} - X_{1i}}{X_{1i}} \right) \times 100 \quad (6)$$

où, n : est la taille de la série ; X_{1i} : désigne les valeurs de la première moitié de la série (années anciennes) et X_{2i} les valeurs correspondantes de la seconde moitié (années récentes).

L'Innovative Trend Analysis (ITA) a été déterminée et les tendances des précipitations ont été visualisées graphiquement à l'aide du package « ggplot2 » du logiciel R Studio.

3. Résultats

3-1. Évolution interannuelle des précipitations

3-1-1. Indice standardisé des précipitations

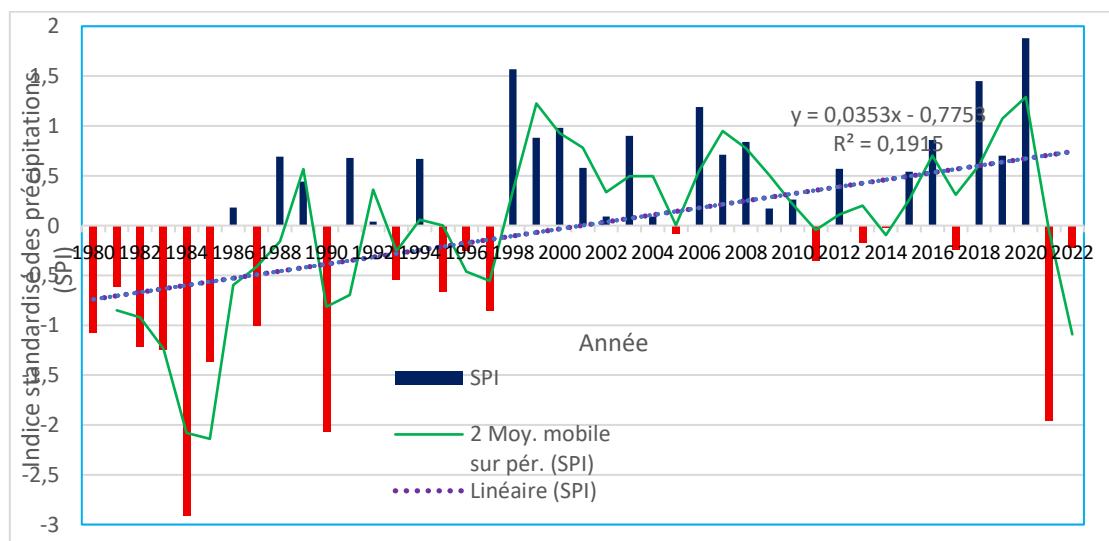


Figure 3 : Indice standardisé des précipitations (SPI) annuel de la ville de Ndjamenà période 1980 à 2022

L'analyse de l'indice standardisé des précipitations (SPI) révèle que (**Figure 3**) la pluviométrie de la période d'étude (1980-2022) est caractérisée par des fluctuations interannuelles très remarquables avec une succession des déficits pluviométriques et des excès pluviométriques. En effet, de 1980 à 2022, il y'a 24 années d'excédent pluviométrique avec des degrés d'humidité différente contre 19 années de déficit pluviométrique avec des degrés de sécheresse variables d'une année sèche à une autre (**Figure 3**). Les années 1998, 2006, 2018 et 2020 ont été des années humides, alors que 1980, 1982, 1983, 1985, 1987 et 2021 ont connu une sécheresse marquée, avec 1984 et 1990 présentant des conditions de sécheresse extrême. Malgré ces fluctuations interannuelles, la tendance générale des précipitations sur la période étudiée est à la hausse, comme l'atteste la pente de régression positive (+0,0353) (**Figure 3**), signe d'une tendance globale à l'humidification.

3-1-2. Caractérisation de la dynamique de transitions pluviométriques par les modèles de chaînes de Markov

L'analyse de la chaîne de Markov d'ordre 1 et 2 a permis de caractériser la dynamique de transitions pluviométriques. Elle a été basée sur la comparaison de critères AIC et BIC. Les résultats montrent que les modèles de la chaîne de Markov d'ordre 1 et 2 ont les valeurs d'AIC à 121,4 et 826,3 et les valeurs de BIC à 164,8 et 1511,7 respectivement pour la série pluviométrique annuelle de 1980 à 2022 de la zone d'étude. Cette analyse indique que la chaîne de Markov d'ordre 1 offre une meilleure performance que celle d'ordre 2. La matrice de transition moyenne du modèle de chaîne de Markov d'ordre 1 MC1 (**Figure 4**), obtenue par simulation de Monte Carlo, indique une forte stabilité des états « humide » (0,96) et « normale » (0,70). Les états extrêmes, en revanche, sont instables : l'état « extrêmement sec » évolue principalement vers « normale » (0,64), tandis que l'état « sec » persiste dans 58 % des cas et peut également passer à « normale » (0,20) ou « très humide » (0,20).

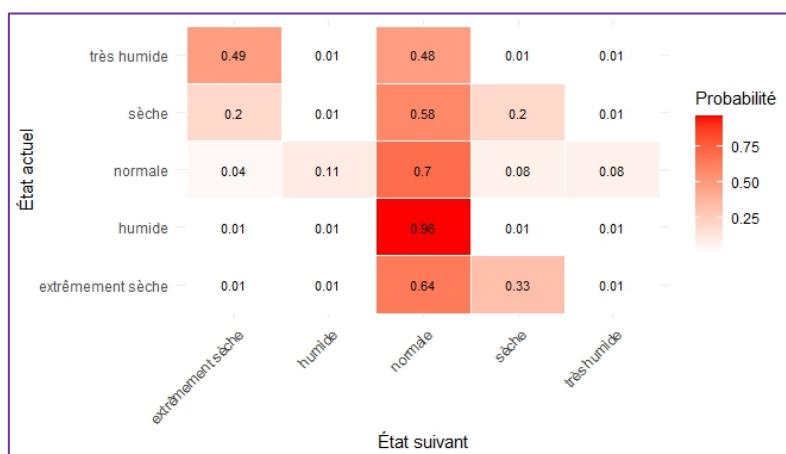


Figure 4 : Matrice de transition moyenne obtenue par simulation de Monte Carlo basée sur SPI

Ces résultats indiquent que les conditions modérées dominent la dynamique pluviométrique, alors que les régimes extrêmes apparaissent transitoirement.

3-2. Détection des ruptures pluviométriques

3-2-1. Test de Pettitt

L'application du test de Pettitt à la série chronologique pluviométriques annuelles met en évidence une rupture significative d'évolution des valeurs pluviométriques au seuil de 5 % ($p < 0,05$). Cette rupture est localisée à la 18^e observation ($t = 18$), correspondant à l'année 1997. Elle se caractérise par la valeur maximale de pluviométrie à Ndjamen (K_N = 288) (**Tableau 2**). L'année 1997 se distingue comme un point de rupture dans le régime pluviométrique, séparant deux sous-périodes de variabilité climatique : une première phase de 1980 à 1996 avec des précipitations croissantes, suivie d'une phase de 1997 à 2022 caractérisée par un régime pluviométrique décroissant (**Figure 5**). Ce résultat met en évidence la non-stationnarité de la série pluviométrique.

Tableau 2 : Résultat du test de Pettitt

Station	$K_N = \max U_{t,n} $	t	$\Pr(K_N > k)$
Ndjamen	288	18	0.00441

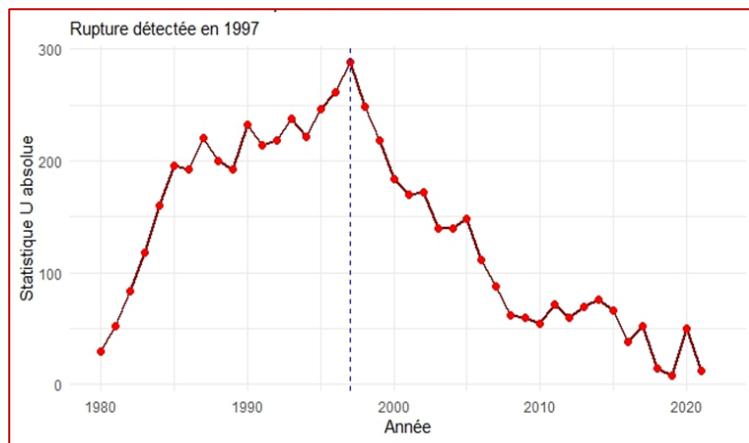


Figure 5 : Évolution de la précipitations annuelles issue du test de Pettitt, illustrant un point de rupture

3-2-2. Segmentation de Hubert

L’application de la méthode de segmentation de Hubert à la série pluviométrique annuelle couvrant la période 1980–2022 met en évidence deux ruptures majeures d’évolution des valeurs pluviométriques annuelles. Ces deux ruptures sont survenues respectivement en 1983 et 1999 (**Figure 6**). Elles permettent d’illustrer la série pluviométrique étudiée en trois régimes distincts :

- 1980–1983 : représente la première phase, avec des valeurs pluviométriques annuelles décroissantes entre 410 mm à 220 mm et une pluviométrie annuelle moyenne estimée à 402,06 mm.
- La période 1984–1999 constitue une phase de reprise pluviométrique, la moyenne annuelle atteignant 508,04 mm. Elle correspond à une relance relative de l’humidité après la sécheresse de 1983, avec une augmentation de 11,64 % des précipitations par rapport à la période précédente, reflétant une amélioration sensible du régime pluviométrique.
- 2000–2022 : cette troisième phase correspond à un épisode d’humidification plus marquée, avec une moyenne de pluviométriques annuelles de 591,97 mm. Après la rupture de 1999, le régime pluviométrique annuelle évolue vers une intensification des précipitations, caractérisé par une fréquence accrue d’années excédentaires et une recrudescence d’épisodes pluvieux extrêmes. On y observe une progression additionnelle de 7,62 % par rapport à la phase intermédiaire et de 19,11 % par rapport à la première phase.

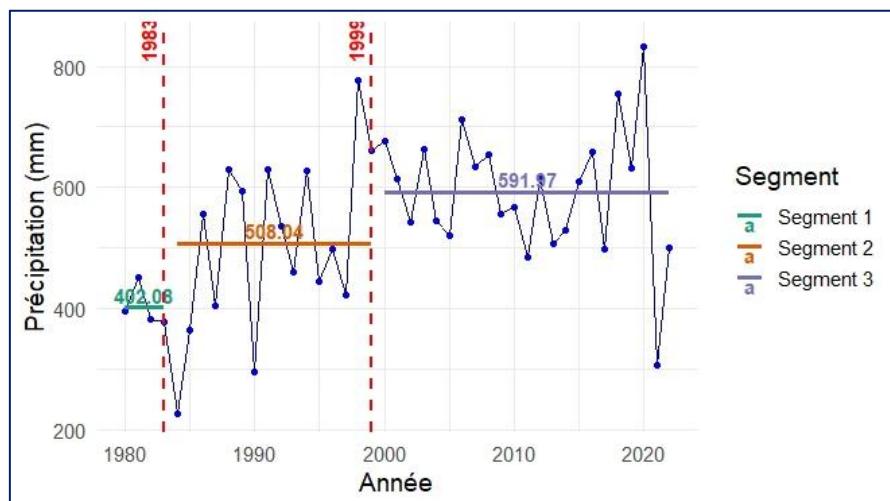


Figure 6 : Évolution pluviométriques annuelles pour la période (1980 2022) issue de la segmentation de Hubert pour détecter les seuils de rupture

3-3. Tendances pluviométriques

3-3-1. Résultat du test de Mann-Kendall saisonnier

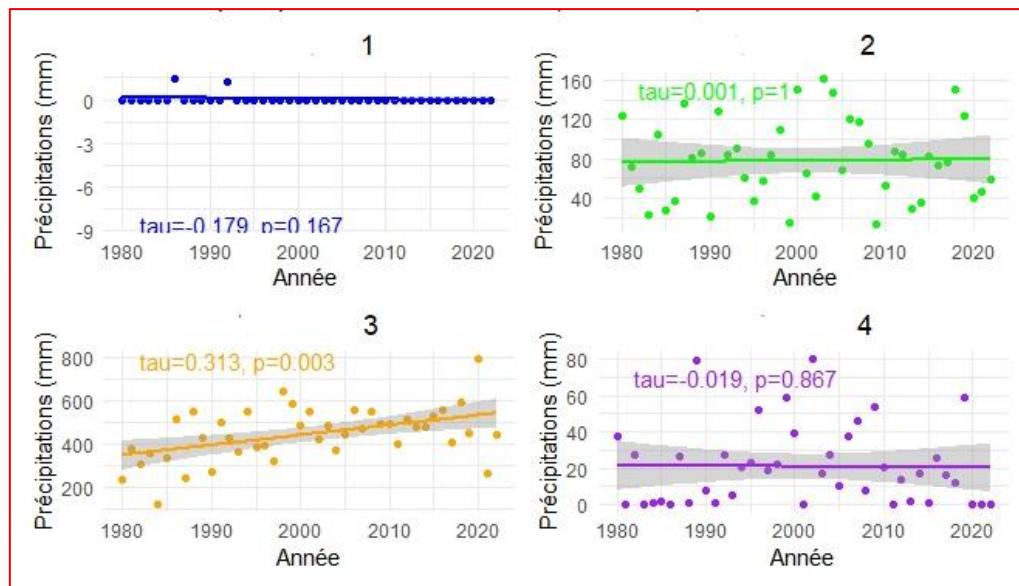


Figure 7 : Tendance des précipitations à pas saisonnier de 1980 à 2022 (1. Saison sèche, 2. Saison subsècheresse à tendance humide, 3. Saison humide, 4. Saison subsècheresse à tendance sèche)

L'analyse des tendances des précipitations à l'aide du test non paramétrique de Mann-Kendall saisonnier a montré des variations hétérogènes selon les saisons (*Tableau 3*). Les moyennes des précipitations saisonnières sont 0,03 mm, 26 mm, 146 mm et 6,95 mm respectivement pour les saison sèche, subsècheresse à tendance humide, humide et subsècheresse à tendance sèche. Au cours de la période étudiée, la saison humide (juillet–septembre) présente une augmentation monotone significative des précipitations ($\tau_i = 0,313$; $p = 0,003$; *Tableau 5, Figure 9*). La variabilité interannuelle pluviométrique reste marquée, avec des totaux saisonniers bas et élevés allant respectivement de 100–200 mm à 700–800 mm. Néanmoins, la tendance saisonnière moyenne centrée indique une progression continue de la pluviométrie (*Figure 9*). Par contre la saison sèche (janvier à mars) présente une tendance pluviométrique saisonnière presque nulle avec un tau (τ_i) significatif négatif ($\tau_i = -0,179$; $p = 0,167$). Quant aux saisons subsècheresses, le tau (τ_i) significatif reste négatif et l'évolution pluviométrique légèrement décroissante, la saison subsècheresse à tendance humide (avril à juin) présente ($\tau_i = -0,001$; $p = 1$) et celle à tendance sèche présente ($\tau_i = -0,019$; $p = 0,867$) (*Tableau 3, Figure 9*).

Tableau 3 : Test de Mann-Kendall saisonnier

Saison écologique	Moyenne des précipitations saisonnières	Tau (τ_i)	p-value
Sèche (janvier – mars)	0,03	-0,179	0,167
subsècheresse à tendance humide (avril – juin)	26	-0,001	1
Humide (juillet – septembre)	146	0,313	0,003
subsècheresse à tendance sèche (octobre – décembre)	6,95	-0,019	0,867

3-3-2. Résultat de la méthode de pente de Sen

L'analyse des résultats de la pente de Sen pour la série chronologique des précipitations annuelles de la ville de Ndjamenà montre une augmentation moyenne de la pluviométrie annuelle de 4,74 mm par an au cours de la période étudiée ($n = 43$ ans) (**Tableau 4**). Ce résultat indique une dynamique croissante du cumul pluviométrique annuel au seuil significatif à $p = 0,0089 < 0,05$.

Tableau 4 : Récapitulatif des résultats de la pente de Sen

Sen's slope	Intervalle de confiance à 95 %	p-value (associée au test de Mann-Kendall)	n(taille de l'échantillon)
4,74 mm/an	[1,37 ; 7,77]	0,0089	43

3-3-3. Résultat de tendances par l'Innovative Trend Analysis

L'analyse de tendance de la série chronologique pluviométriques annuelles (1980–2022) réalisée via la méthode Innovative Trend Analysis (ITA) révèle une modification significative de la pluviométrie au cours de la période considérée (**Figure 8**). Elle montre que la majorité des points pluviométriques se situent au-dessus de la diagonale 1:1, signalant un mouvement général vers des précipitations plus abondantes, particulièrement pour les années à pluviométrie faible à modérée, traduisant une amélioration progressive des années sèches. Les deux moitiés de la série (**Figure 8**) illustrent une tendance linéaire ascendante (**Figure 9**), avec une pente ITA de 0,689 (IC95 % : [0,491 ; 0,888] ; $p < 0,0001$), reflétant un renforcement significatif du régime pluviométrique récent. Le coefficient de détermination ($R^2 = 0,736$) indique que près de 74 % de la variance observée entre les deux moitiés de la série pluviométrique est expliquée par la relation linéaire.

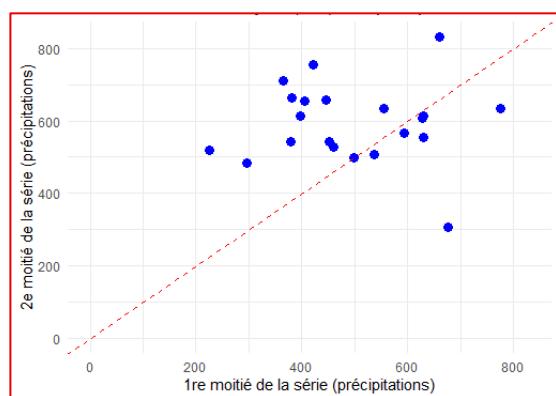


Figure 8 : ITA des pluviométries annuelles

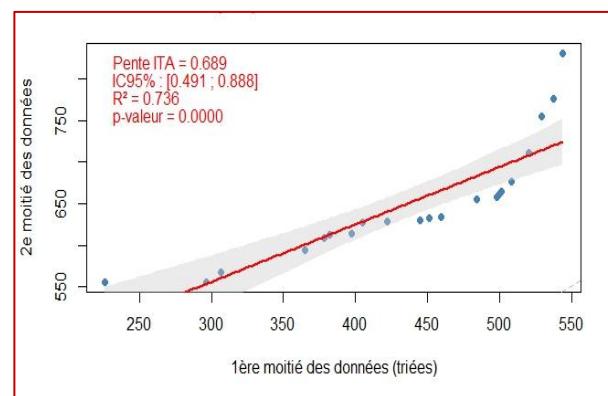


Figure 9 : ITA avec droite de tendance

4. Discussion

4-1. Variabilité interannuelle des précipitations et tendance à l'humidification et leur incidence sur le système d'assainissement pluvial

L'analyse interannuelle des précipitations à N'Djamena sur la période 1980–2022 montre une tendance significative à l'humidification du climat urbain. L'application de la méthode non paramétrique de Sen, pour quantifier la tendance de la série temporelle des précipitations, montre leur intensification progressive de 4,74 mm par an. Cette tendance à l'augmentation de la pluviométrie confirme les résultats de SPI, qui indiquent une prédominance d'années excédentaires (55,82 %) par rapport aux années déficitaires (44,18 %).

La pente positive de Sen ($\text{slope} = 0,0353 \text{ an}^{-1}$) et la droite de tendance linéaire de SPI (**Figure 3**) confirme cette dynamique, en accord avec [35] qui décrivent une reprise pluviométrique au Sahel central depuis le début des années 2000, malgré une forte variabilité interannuelle. La matrice de transition basée sur SPI issue de la méthode de la chaîne de Markov 1 (**Figure 4**) indique une persistance marquée de l'état « normal » (70 %). Ces résultats s'alignent avec ceux de [36] qui montrent que les conditions climatiques normales agissent comme des attracteurs dynamiques. Les séries climatiques stationnaires, malgré les fluctuations interannuelles, tendent à revenir vers cet état normal, assurant ainsi une stabilité relative des propriétés statistiques au fil du temps. Une instabilité asymétrique et des basculements climatiques abrupts sont révélés par les régimes extrêmes : le passage direct du régime « très humide » à « extrêmement sec » et normal se produit avec une probabilité de 50 %, tandis que le régime « extrêmement sec » est susceptible de transitionner vers un régime « normal » avec une probabilité supérieure (64 %), mettant en évidence une forte instabilité et une prévisibilité limitée (**Figure 4**). Ces résultats s'alignent avec les simulations hydrologiques bistables de [37] et les observations de [38] sur l'augmentation de l'anisotropie des pluies extrêmes au Sahel. Cette instabilité pluviométrique a des effets directs sur la performance des réseaux d'assainissement pluvial de N'Djamena : 1) les épisodes « très humides » concentrés sur quelques jours génèrent des débits de pointe supérieurs à la capacité hydraulique des collecteurs, provoquant des débordements [19, 21] ; 2) les alternances rapides entre sécheresses et fortes pluies augmentent la charge en sédiments et la probabilité d'obstruction des conduites, réduisant leur efficacité [39] ; et 3) les transitions directes entre régimes extrêmes (sec ou humide) fragilisent les plans de dimensionnement basés sur des pluies de période de retour régulière, car elles invalident l'hypothèse de stationnarité [40]. Ces constats rejoignent celui de [41], qui montrent que la variabilité des extrêmes pluviométriques dans les grandes villes sahariennes compromet la résilience des systèmes de drainage. [42] recommandent d'intégrer les modèles hydrologiques probabilistes dans la planification urbaine.

4-2. Changements de régime et ruptures climatiques

Les ruptures structurelles des précipitations identifiées à N'Djamena autour de 1983, 1997 et 1999 à l'aide des méthodes de Pettitt et de segmentation de Hubert, corroborent les dynamiques pluviométriques observées dans d'autres régions sahariennes et tropicales, telles que le bassin de l'Ogun au Nigeria [43] et le bassin d'Itaipu au Brésil [44]. Dans ces régions, des changements significatifs ont été détectés à des périodes similaires, traduisant une transition vers des régimes plus humides ou plus instables. Ces résultats s'inscrivent également dans le contexte plus large d'une intensification de la variabilité interannuelle des précipitations en Afrique de l'Ouest, marquée par une récurrence accrue des extrêmes hydrologiques [45]. Au sein du bassin versant du Chari-Logone, plusieurs ruptures pluviométriques structurées ont été documentées dans les stations de Bongor (1977), Sarh (1975) et Moundou (2010), selon les analyses de rupture (Pettitt et segmentation de Hubert) menées par [46]. Ces ruptures témoignent d'un changement de régime pluviométrique à l'échelle locale, corroborant ainsi avec les discontinuités significatives détectées dans l'analyse pluviométrique faite à N'Djamena.

4-3. Autres tendances pluviométriques et leur incidence sur le système d'assainissement pluvial

Sur le plan saisonnier et selon la méthode de Mann Kendall saisonnier, seule la période de juillet à septembre présente une augmentation significative des précipitations. Ce qui traduit une concentration temporelle des pluies. Ce phénomène est remarqué dans d'autres régions sahariennes, notamment dans le bassin du fleuve Sénégal [47, 48] et dans le haut bassin de la Volta [49]. La concentration des précipitations sur des séries temporelles plus courtes augmente les risques de surcharge hydraulique dans les réseaux d'assainissement pluvial. À N'Djamena, la progression rapide de l'imperméabilisation des surfaces urbaines, combinée à la

vétusté des infrastructures, favorise l'accumulation des eaux stagnantes et leur débordement. Les inondations survenues en 2022, parmi les plus marquantes des six dernières décennies, illustrent clairement cette dynamique [50, 51]. Les résultats de l'Innovative Trend Analysis (ITA) révèlent une progression significative de la pluviométrie entre les périodes 1980–2000 et 2001–2022 (+62,2 %), attestant de son intensification. Cette évolution, s'inscrivant dans un renforcement régional du cycle hydrologique [11, 52], se traduit par des épisodes pluviométriques plus fréquents et plus intenses, soulignant la vulnérabilité structurelle des systèmes de drainage urbain.

5. Conclusion

L'étude des précipitations à Ndjamenà entre 1980 et 2022 montre une humidification progressive caractérisée par une forte concentration des pluies. L'augmentation de l'ITA (+68, 90 %) et les ruptures détectées (1983, 1997, 1999) confirment une transition durable vers un régime pluviométrique plus humide. L'analyse stochastique par chaînes de Markov indique une forte persistance de l'état normal caractérisée par une forte probabilité ($p \approx 0,70$). Cela traduit que les états extrêmes sont majoritairement transitoires. Ces résultats montrent que : 1) le régime dominant est celui des conditions normales, temporairement perturbées par des sécheresses ou des excès d'humidité ; 2) la sévérité des états extrêmes peut avoir un impact critique sur les systèmes urbains d'assainissement pluvial et 3) la période juillet – septembre est marquée par une concentration des pluies qui accentue la vulnérabilité de la ville aux catastrophes naturelles. Ces constats soulignent la nécessité de réviser les modèles hydrologiques et les stratégies de planification urbaine, en intégrant le redimensionnement des dispositifs de drainage, le recours à des solutions fondées sur les processus hydrologiques naturels favorisant l'infiltration et le ralentissement des écoulements, ainsi qu'une maintenance proactive des infrastructures existantes.

Références

- [1] - L. HAN, L. WANG, H. CHEN, Y. XU, F. SUN, K. REED, X. DENG et W. LI, Impacts of long-term urbanization on summer rainfall climatology in the Yangtze River Delta agglomeration of China, *Geophysical Research Letters*, 49 (2022) e2021GL097546
- [2] - S. HUANG, Y. GAN, X. ZHANG, N. CHEN, C. WANG, X. GU, J. MA et D. NIYOGI, Urbanization amplified asymmetrical changes of rainfall and exacerbated drought, *Earth's Future*, (2023)
- [3] - J. YIN, D. YAN, Z. YANG, Z. YUAN, Y. YUAN et ZHANG, Projection of extreme precipitation in the context of climate change in Huang-Huai-Hai region, China, *Journal of Earth System Science*, 125 (2) (2016) 417 - 429
- [4] - H. BESAKLIA, A. N. GHENIM, A. MEGNOUNIF et J. MARTIN-VIDE, Spatial variability of concentration and aggressiveness of precipitation in North-East of Algeria, *Journal of Water and Land Development*, 36 (1) (2018) 3 - 15
- [5] - L. GAO, J. HUANG, X. CHEN, Y. CHEN et M. LIU, Contributions of natural climate changes and human activities to the trend of extreme precipitation, *Atmospheric Research*, 205 (2018) 60 - 69
- [6] - A. DOMMO, N. ALOYSIUS, A. LUPO et S. HUNT, Spatial and temporal analysis and trends of extreme precipitation over the Mississippi River Basin, USA during 1988–2017, *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 56 (2024) 101954
- [7] - Q. SUN, X. ZHANG, F. ZWIERS, S. WESTRA et L. V. ALEXANDER, A global, continental, and regional analysis of changes in extreme precipitation, *Journal of Climate*, 34 (1) (2021) 243 - 258

- [8] - H. OUAKHIR, N. ENNAJI, V. SPALEVIC, M. GOMIH, O. GHADBANE, M. CHAKIR et M. EL GHACHI, Changes in river bank morphology in a small meander of El Abid river, Atlas Mountains, Morocco, *Poljoprivreda i Sumarstvo*, 69 (3) (2023) 199 - 209
- [9] - M. V. BESSAN, E. W. VISSIN, K. F. OGOU et E. OGOUWALE, Variabilité hydrométrique et leur relation avec la pluviométrie dans le département du Mono entre 1960 et 2019, Bénin (Afrique de l'Ouest), *ESJ Natural/Life/Medical Sciences*, (2024)
- [10] - S. SALACK, C. KLEIN, A. GIANNINI, B. SARR, O. N. WOROU, N. BELKO, J. BLIEFERNICHT et H. KUNSTMANN, Global warming induced hybrid rainy seasons in the Sahel, *Environmental Research Letters*, (2016)
- [11] - F. SYLVESTRE, A. MAHAMAT-NOUR, T. NARADOU, M. ALCOBA, L. GAL, A. PARIS, J. F. CRETAUX, B. PHAM-DUC, C. LESCOULIER, R. RECOUVREUR, M.M. AHMAT et D. GAYA, Strengthening of the hydrological cycle in the Lake Chad Basin under current climate change, *Scientific Reports*, 14 (2024) 24639
- [12] - N. CHITRA, B. POHL, L. RÜTTINGER, F. SYLVESTRE, J. VIVEKANANDA, M. WALL et S. WOLFMAIER, Climate-fragility profile : Lake Chad Basin, Berlin : adelphi, (2018)
- [13] - H. NIEL, C. LEDUC et C. DIEULIN, Caractérisation de la variabilité spatiale et temporelle des précipitations annuelles sur le bassin du Lac Tchad au cours du 20^e siècle, *Hydrological Sciences Journal*, 50 (2) (2005) 223 - 243
- [14] - E. FITA DASSOU, A. OMBODO, G. EWODO MBOUDOU, S. CHOUTO, E. BINELI AMBOMO et J. M. ABATE ESSI, Caractérisation de la variabilité spatio-temporelle des précipitations dans la zone soudano-sahélienne du Cameroun au cours des cinq dernières décennies, *Afrique Science*, 11 (2015) 331 - 348
- [15] - L. LE BARBÉ et T. LEBEL, Rainfall climatology of the HAPEX-Sahel region during the years 1950–1990, *Journal of Hydrology*, 188 - 189 (1997) 43 - 73
- [16] - T. LEBEL et A. ALI, Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime, *Journal of Hydrology*, 375 (1 - 2) (2009) 52 - 64
- [17] - M. DESBORDES et C. BOUVIER, Assainissement pluvial urbain en Afrique de l'Ouest : modélisation du ruissellement (rapport final), IRD / ORSTOM, (1990)
- [18] - B. CHOCAT, Encyclopédie de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement, Paris : Tec & Doc (Lavoisier), (1997) 1136 p. ISBN-10 : 2743001267 ; ISBN-13 : 978-2743001261
- [19] - N. TELLRO WAI, Effets des inondations de 2012 en relation avec les prévisions saisonnières climatiques dans les portions camerounaise et tchadienne du bassin du fleuve Logone, une des composantes fluviatiles du système Chari-Logone au Lac Tchad, *Conférence Internationale sur l'Hydrologie des Grands Bassins Africains*, Dakar, Sénégal, 26 novembre – 3 décembre (2016) 26 p.
- [20] - A. CHOUAIROU, Gestion durable des inondations dans la ville de Maroua au Cameroun : enjeux et stratégies locales, *Thèse de Doctorat*, Université de Maroua, (2018)
- [21] - G. PANTHOU, T. VISCHEL et T. LEBEL, Recent trends in the regime of extreme rainfall in the Central Sahel. *Int J Climato*, 34 (15) (2014) 3998 - 4006
- [22] - J. SERVAT, Étude des modifications récentes du régime pluviométrique en Afrique de l'Ouest et Centrale : analyse statistique et hydrologique de la variabilité temporelle, *Thèse de Doctorat*, Université Montpellier II, (1994) 302 p.
- [23] - J. P. GIRARD, Contribution à l'étude du fonctionnement hydrologique du bassin du lac Tchad : le rôle des nappes phréatiques, *Thèse de Doctorat*, Université de Paris VI, (1975) 212 p.
- [24] - B. LAMAGAT, G. MAHÉ, J. E. PATUREL et E. SERVAT, Variabilité climatique et statistiques hydrologiques en Afrique de l'Ouest et Centrale : diminution des écoulements et des précipitations, *Hydrological Sciences Journal*, 47 (6) (2002) 1091 - 1102
- [25] - J. DEME et E. SERVAT, Identification d'une modification dans la série des précipitations au Sénégal et en Gambie : caractérisation et interprétation hydrologique, *IAHS Publ.*, 252 (1998) 15 - 23

- [26] - G. MAHÉ, J. E. PATUREL, A. DEZETTER, H. KARAMBIRI, E. SERVAT et J. M. FRITSCH, Evolution des régimes hydrologiques en Afrique de l'Ouest et Centrale au cours du 20^e siècle : des sécheresses persistantes et des écoulements en baisse, *Hydrological Sciences Journal*, 48 (1) (2003) 111 - 123
- [27] - S. TCHINDA, Effet du changement climatique sur la ressource en eau dans la région de l'Extrême-Nord Cameroun : étude du bassin versant du Mayo Tsanaga, *Thèse de Doctorat*, Université de Ngaoundéré, (2017) 240 p.
- [28] - G. MAHÉ et E. SERVAT, Climatic variability and change in West and Central Africa: the role of rainfall in the evolution of surface water resources, *Hydrological Sciences Journal*, 46 (2) (2001) 211 - 226
- [29] - M. BAYAZIT, D. E. AKYÜZ et B. ONOZ, Markov Chain Models for Hydrological Drought Characteristics, *Journal of Hydrometeorology*, 13(1) (2012) 298 - 309
- [30] - A. N. PETTITT, A non-parametric approach to the change-point problem, *Journal of the Royal Statistical Society : Series C (Applied Statistics)*, 28 (2) (1979) 126 - 135
- [31] - P. HUBERT, J. P. CARBONNEL & A. CHAOUCHE, Segmentation des séries hydrométéorologiques - application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest. *Journal of Hydrology*, 11 (1989) 349 - 367
- [32] - R. M. HIRSCH, J. R. SLACK et R. A. SMITH, Techniques of trend analysis for monthly water quality data, *Water Resources Research*, 18 (1982) 107 - 121
- [33] - Z. SEN, Innovative trend analysis methodology, *Journal of Hydrologic Engineering*, 17 (9) (2012) 1042 - 1046
- [34] - J. YAMÉOGO, Annual rainfall trends in the Burkina Faso Sahel: A comparative analysis between Mann-Kendall and innovative trend method (ITM). *Discover Applied Sciences*, 7, Article 221, (2025)
- [35] - J. DORRINGTON, T. N. PALMER, On the interaction of stochastic forcing and regime dynamics. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 30 (2023) 49 - 62
- [36] - E. LE ROUX, V. WENDLING, G. PANTHOU, O. DUBAS, J.-P. VANDERVAERE, B. HÉCTOR, G. FAVREAU, J.-M. COHARD, C. PIERRE, L. DESCROIX, E. MOUGIN, M. GRIPPA, L. KERGOAT, J. DEMARTY, N. ROUCHE, J. ETCHANCHU et C. PEUGEOT, Hydrological regime shifts in Sahelian watersheds: An investigation with a simple dynamical model driven by annual precipitation, *EGUsphere [preprint]*, (2025)
- [37] - J. BLANCHET, C. ALY, T. VISCHEL, G. PANTHOU, Y. SANÉ et M. DIOP KANE, Trend in the co-occurrence of extreme daily rainfall in West Africa since 1950, *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 123 (3) (2018) 1536 - 1551
- [38] - M. DESBORDES et C. BOUVIER, Assainissement pluvial urbain en Afrique de l'Ouest : modélisation du ruissellement (rapport final), *IRD / ORSTOM*, (1990)
- [39] - B. HABIBI, M. MEDDI, P. J. J. F. TORFS, M. REMAOUN et H. A. J. VAN LANEN, Characterisation and prediction of meteorological drought using stochastic models in the semi-arid Chélif-Zahrez basin (Algeria), *Journal of Hydrology : Regional Studies*, 16 (2018) 15 - 31
- [40] - L. P. M. DIÉMÉ, C. BOUVIER, A. BODIAN et A. SIDIBÉ, Modelling urban stormwater drainage overflows for assessing flood hazards: application to the urban area of Dakar (Senegal), *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 25 (2025) 1095 - 1112
- [41] - A. NDIAYE, M. L. MBAYE, J. ARNAULT, M. CAMARA et A. E. LAWIN, Characterization of extreme rainfall and river discharge over the Senegal River Basin from 1982 to 2021, *Hydrology*, 10 (10) (2023) 204
- [42] - O. OLUWATOYIN, J. HOUNKPÈ, K. O. OLUWASEMIRE et A. E. LAWIN, Hydroclimatic trends, breakpoints and future projection analysis of the Ogun River Basin in West Africa, *Water Practice & Technology*, 18 (9) (2023). DOI: 10.2166/wpt.2023.061
- [43] - L. C. CONTE, D. M. BAYER et F. M. BAYER, Bootstrap Pettitt test for detecting change points in hydroclimatological data: case study of Itaipu Hydroelectric Plant, Brazil, *Hydrological Sciences Journal*, 64 (11) (2019) 1312 - 1326

- [44] - M. DIAKHATÉ, B. RODRÍGUEZ-FONSECA, I. GÓMARA, E. MOHINO, A. L. DIENG et A. T. GAYE, Oceanic forcing on interannual variability of Sahel heavy and moderate daily rainfall, *Earth System Dynamics*, 15 (2024) 15 - 40
- [45] - A. M. NOUR, C. VALLET-COULOMB, J. GONÇALVÈS, F. SYLVESTRE et P. DESCHAMPS, Rainfall–discharge relationship and water balance over the past 60 years within the Chari-Logone sub-basins, Lake Chad basin, *Journal of Hydrology : Regional Studies*, 35 (2021) 100824
- [46] - A. NDIAYE, M. L. MBAYE, J. ARNAULT, M. CAMARA et A. E. LAWIN, Characterization of Extreme Rainfall and River Discharge over the Senegal River Basin from 1982 to 2021, *Hydrology*, 10 (10) (2023) 204
- [47] - B. ANSOUMANA, L. DIOP, G. PANTHOU, H. DACOSTA, A. DEME, A. DEZETTER, P. M. NDIAYE, I. DIOUF et T. VISCHEL, Recent evolution of rainfall in the Senegal River basin, *Theoretical and Applied Climatology*, 143 (1) (2020) 57 - 72
- [48] - M. DEMBÉLÉ, M. VRAC, N. CEPERLEY, S. J. ZWART, J. LARSEN, S. J. DADSON, G. MARIETHOZ et B. SCHAEFLI, Contrasting changes in hydrological processes of the Volta River basin under global warming, *Hydrology and Earth System Sciences*, 26 (5) (2022) 1481 - 1506
- [49] - WORLD BANK, Chad Economic Update : Targeted Policy Reforms Can Boost Resilience to Climate Change and Flooding, *World Bank Publications*, (2023)
- [50] - Médecins Sans Frontières (MSF), Floods in N'Djamena, Chad, deepen humanitarian crisis, high risk of disease outbreaks, *MSF International*, (2022, November 3)
- [51] - B. PHAM-DUC, F. SYLVESTRE, F. PAPET, F. FRAPPART, C. BOUCHEZ, J.-F. CRÉTAUX, A. MAHAMAT-NOUR, T. NARADOUR, C. LESCOULIER, R. RECOUVREUR, M. MAHAMAT AHMAT et D. GAYA, The Lake Chad hydrology under current climate change, *Scientific Reports*, 10 (2020) 5498